

Ulrich Schiewer

Regulationsmechanismen und Wechselwirkungen zwischen Pelagial und Benthos

Abstract

Phytoplankton is the most important primary producer in the investigated highly eutrophic ecosystem. It is controlled by the influences of abiotic factors mainly. Biotic regulation processes are governed by the microbial web interactions in the pelagic zone. Bacteria are the most important secondary producers while protozoans act as the main nutrient remineralizers. The high detritus content plays an important role in ecosystem stabilization. The dominance of the microbial food web leads to enhanced flow rates, high buffering capacity and reduced restoration possibilities in the ecosystem. There is an undesirable lack of knowledge in regulation phenomena among biota in the sediment.

In den Mittelpunkt der Betrachtungen soll die Regulation des Kohlenstoffumsatzes gestellt werden. Die wichtigsten Kohlenstoffquellen der DZBK sind entsprechend ihrer Bedeutung: die Phytoplankton- und Makrophytenproduktion (POC, DOC), der allochthone Kohlenstoffeintrag (POC, DOC), die bakterielle Sekundärproduktion (POC) und die Mikrophytobenthosproduktion (POC, DOC).

In Tab. 1 sind die Produktionsleistungen der autotrophen Komponenten für den Barther Bodden von WASMUND (1986) berechnet und zusammengestellt worden.

Nach den bisherigen Befunden dürfte damit zumindest während der Vegetationsperiode von April bis November eine ausreichende DOC-Versorgung für die Bakterien vorliegen. Deren Entwicklung wird damit offenbar weitgehend über Top-down-Regulationen kontrolliert. Hervorzuheben ist, daß sie die wichtigsten Sekundärproduzenten in der DZBK sind, während ihnen als "Mineralisierer" nur eine untergeordnete Rolle zukommt. Die entscheidenden "Mineralisierer" sind die Protozoen. Daneben spielen für kurze Zeiträume die Copepoden (April/Mai) und die Rotatorien (Juli/August) eine größere Rolle.

Tabelle 1 Gesamtbilanz der Nettoprimärproduktion (NP) im Barther Bodden für den Zeitraum von April bis Oktober (nach WASMUND 1986).

Organismengruppe			NP in den bis 1 m tiefen Teilen	
	in t C	in %	in t C	in %
Phytoplankton	3.500	93,0	480	64,7
Makrophytobenthos	95	2,5	95	12,8
an Schilf angeheftetes Mikrophytobenthos	7	0,2	7	0,9
epipsammisches Mikrophytobenthos	160	4,3	160	21,6
SUMME	3 762	100	742	100

Das gesamte verfügbare POC- und DOC-Angebot aus den oben genannten Quellen wird in den 3 Reaktionsräumen Pelagial, Präsediment und Sediment umgesetzt. Die Ausweisung einer eigenständigen Detritusnahrungskette, wie sie üblicherweise in Ästuaren erfolgt, ist nach unserer Ansicht überholt. Das Detritus (DOC und totes POC) ist vielmehr ein immanenter Bestandteil aller wesentlichen Kohlenstoffflüsse in der DZBK. Er wird fast stets zusammen mit lebendem Material (Bakterien, Pico-, Nano-, Netzplankton etc.) genutzt. Dabei gehören Umsteuerungen in seiner Nutzung zu den typischen Regulationsmechanismen im untersuchten Ökosystem. Die Umsteuerungen sind bedingt durch:

- Zeitweise Veränderungen in der Intensität der autotrophen Primärproduktion
- Jahreszeitliche Veränderungen, z. B. durch Verringerung des Angebotes an lebendem POC im Winterhalbjahr
- Durch den Umsatzort, z. B. der deutlich höhere Detritusanteil im C-Umsatz des Sediments.

Die Abb. 1 gibt einen Überblick über die Bedeutung der einzelnen Organismengruppen (Biomasse und Umsatzleistung) für den Kohlenstoffumsatz.

Sie verdeutlicht die dominierende Rolle des mikrobiellen Nahrungsgefüges in allen 3 Reaktionsräumen. Nachteilig ist, daß zwischen der Präsediment- und Pelagialeistung zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht ausreichend differenziert werden kann. Wir vermuten aber, daß durch die Verdichtung von Grazing-Netzen bei der Partikelbildung dem Präsediment die entscheidende Rolle im Gesamtstoffwechsel der DZBK zukommt.

Fassen wir den Gesamtprozeß in einen Pelagial-Präsediment-Komplex und in einen Präsediment-Sediment-Komplex zusammen, so ergeben sich die in Abb. 2 und 3 dargestellten Hauptprozesse.

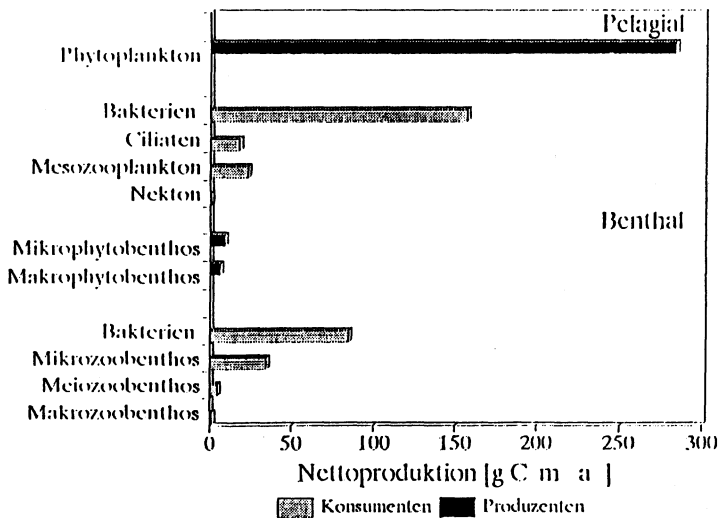
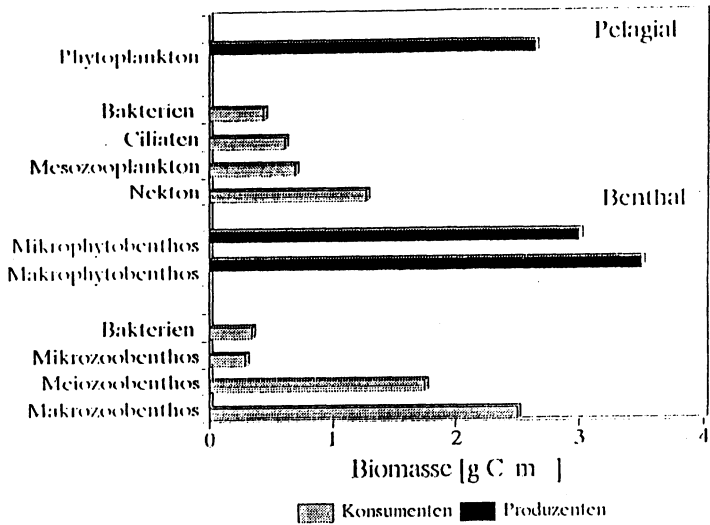


Abb. 1 Biomasse und Produktionsanteile der wichtigsten funktionellen Gruppen im Barther Bodden.
a. Biomasse in $\text{g C} \cdot \text{m}^{-2}$
b. Nettojahresproduktion in $\text{g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$.

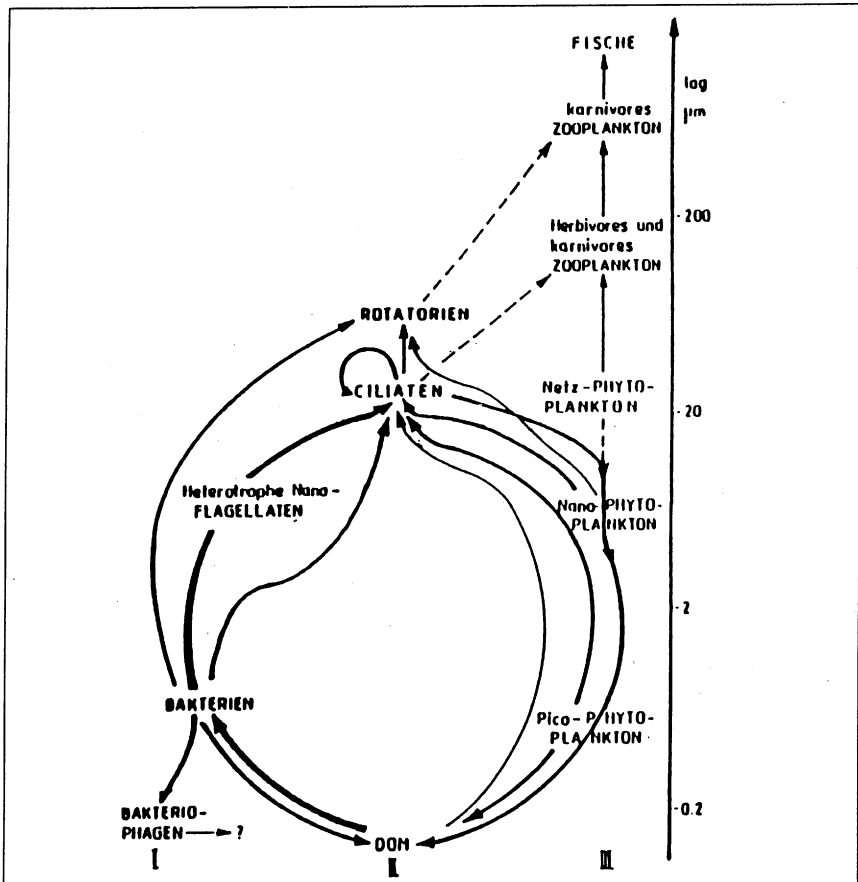


Abb. 2 Vereinfachtes Gesamtschema des Nahrungsgefüges im Pelagialsystem der Darß Zingster Boddenkette.
Sommersituation. I = Nebenkette über Bakteriophagen; II = mikrobielles Nahrungsgefüge. Hauptweg des Kohlenstoffumsatzes unter Einbeziehung des Pico- und Nanophytoplanktons; III = "Weidenahrungskette"; typischer Teil Netzphytoplankton - Evertbraten - Fische; nur von untergeordneter Bedeutung.

Durch die aeroben Bedingungen im Pelagial-Präsediment-Komplex weist dieser ein höheres Leistungsvermögen auf. Zusammen mit dem weitaus größeren aeroben Reaktionsraum in der DZBK verlaufen die Hauptflüsse des Kohlenstoffkreislaufes und damit des Energieflusses über den Pelagial-Präsediment-Komplex. Die typische "Weidenahrungskette", ausgehend vom Netzphytoplankton, ist nur von geringer Bedeutung. Die Begrenzung liegt in den Biomassen und

Umsatzraten der Crustaceen. Die am mikrobiellen Nahrungsgefüge (Abb. 2 und Abb. 3) beteiligten Organismen gehören vorwiegend dem Größenbereich von 0 bis 200 μm an. Sie verfügen damit über sehr gute Oberflächen/Volumen-Relationen. Das fördert den Stoffaustausch mit der Umwelt, sichert hohe Umsatzraten (P/B-Werte) und hohe Respirations/Biomasse-Verhältnisse. Daraus ergeben sich Konsequenzen mit großer praktischer Bedeutung:

- Erhebliche Beschleunigung aller Kreislaufprozesse und Energieflüsse
- Schnelle Remineralisierung der wichtigsten Nährstoffe, vor allem N und P. Diese "regenerierten" Nährstoffe sind in zunehmenden Maße der Eutrophierungsfaktor über den hohe Phytoplanktonbiomasse ohne Zufuhr zusätzlicher Nährstoffe von außen ("neue" Nährstoffe) im Pelagial erhalten werden können.

Die Flachheit der Boddengewässer bedingt ständige Wechselwirkungen von Pelagial, Präsediment und Sediment. Ausdruck dessen ist die Existenz eines leichtbeweglichen Präsediments (Rebound Particles). Es besteht vorwiegend aus toten und lebenden organischen sowie aus anorganischen Materialien. Durch Strömung und Wind gelangt es in grobdisperser Form in das Pelagial (Abb. 4).

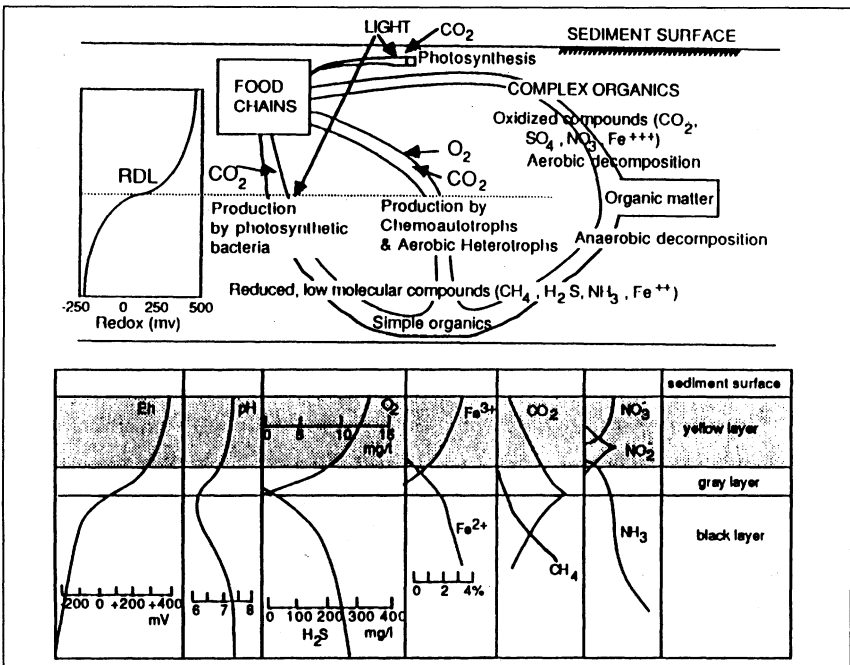


Abb. 3 Umsatzleistungen im Sediment. FENCHEL und RIEDL (1970). Schematische Darstellung des Energieflusses und wichtiger mikrobieller Prozesse sowie der Vertikalprofile Eh, pH u.a. in Ästuarsedimenten im Bereich der Redoxsprungschicht.

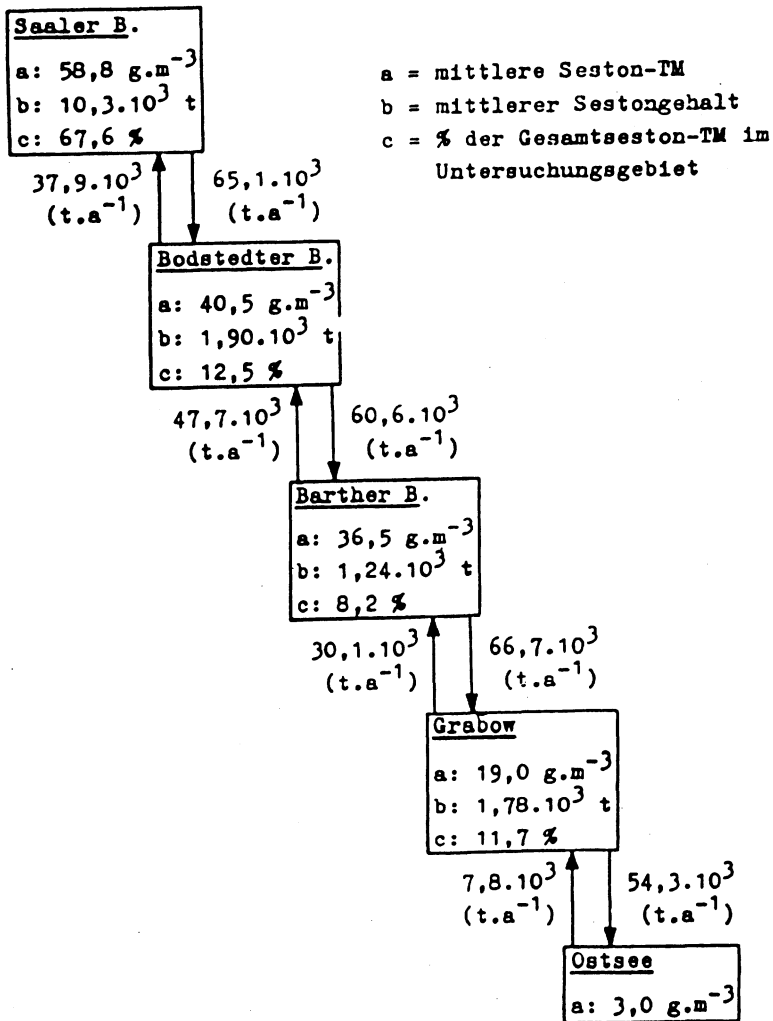


Abb. 4 Sestongehalt in der Darß-Zingster Boddenkette (nach GEORGI 1983).

Neuere Untersuchungen im Zingster Strom zeigen, daß sich die relativen Verhältnisse im Seston gegenüber den Bedingungen von 1983 (GEORGI 1983) trotz absoluter Veränderungen nicht wesentlich verschoben haben. Der Detritusgehalt betrug in Experimentalansätzen mit einer verstärkten Stickstofflimitation noch 82% des Gesamtsestons (GEORGI 85 - 97% im Juni/Juli seiner Untersuchungsperiode). Eine stärkere Verschiebung war durch Nährstoffanreicherungen möglich. Unter den gewählten Bedingungen erreichten wir im Juni/Juli ein Absenken des Detritusanteils auf 62%, verbunden mit einem Anstieg vor allem von lebendem Phytoplankton. Mobilität und der ständige Wechsel zwischen einer sedimentierten und einer dispersen Verteilung des Präsediments im Pelagial dürften entscheidend die Umsatzleistungen und die Produktivität der beteiligten autotrophen und heterotrophen Organismen beeinflussen. Eindeutige Aussagen dazu fehlen bisher, sie sind aber für das Verständnis der Vorgänge im Boddenökosystem bedeutsam.

Die anaeroben Prozesse des C-Umsatzes im Präsediment-Sediment-Komplex sind an die Remineralisierung, Denitrifikation, H_2S - und Methanbildung gekoppelt. Steuernd auf die Remineralisierung wirken der Versorgungsgrad mit organischem Kohlenstoff, die Sauerstoffversorgung, die Verfügbarkeit von SO_4 , NO_3 und von CO_2 . Die vertikalen Gradienten im Sediment (Abb. 3b) bestimmen die Umsatzart und die Höhe der Energieausbeuten. Genaue Aussagen zur Regulation sind z.Z. nicht möglich. Ein wichtiger negativer Einflußfaktor ist H_2S . Es entsteht als Produkt der SO_4 -Reduktion und ist für viele Organismen toxisch. Andererseits stehen aber H_2S , NH_4 und CH_4 den chemoautotrophen Bakterien als Energiequellen zur Verfügung. Ihr Anteil am Gesamtkohlenstoffumsatz dürfte aber nur relativ gering sein.

Meio- und Makrozoobenthos sind am Gesamtumsatz meist nur in geringem Maße beteiligt. Untersuchungen von ARLT und ARNDT zeigen aber, daß durch zeitweise Massenentwicklung eine deutliche Beeinflussung der Stoffflüsse vorliegen kann. Weit größer aber dürfte ihr indirekter Einfluß über die Bioturbation sein. Sie verbessert die Sauerstoffzufuhr zum Sediment, vergrößert den Reaktionsraum und führt zum Abbau von Konzentrationsgradienten. Eine Quantifizierung und Detailanalyse dieser Prozesse steht noch aus. Erweiterte Kenntnisse wurden in den letzten Jahren vor allem für das Pelagial durch Experimentalanalysen mittels Freiland- und Labormesokosmen erarbeitet. Drei Aspekte der Regulation sind besonders hervorzuheben:

- ♦ Die Erhöhung der autotrophen Produktivität und Biomasse verändert die relativen Anteile der beteiligten Produzenten (Abb. 5a). Sie verändert aber nicht die relativen Anteile der beteiligten Sekundärproduzenten.
- ♦ Eine ständig hohe (N + P)-Versorgung verschiebt die Relationen lebendes Phytoplankton/Detritus zugunsten des ersteren (Abb. 5c).
- ♦ Unter den aeroben Bedingungen des Pelagials führt die durch (N + P)-Zusatz bedingte Steigerung der autotrophen Produktion und Biomasse nicht zu einer Erhöhung des Trockenmassegehaltes gegenüber der unbehandelten Kontrolle (Abb. 6).

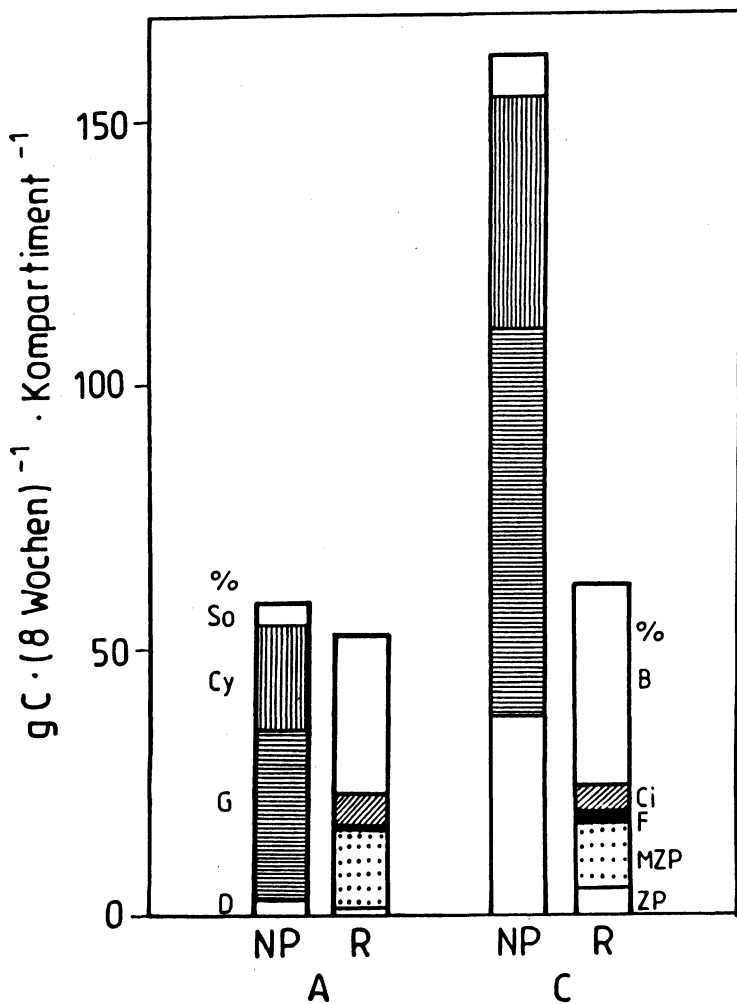


Abb. 5 Kohlenstoffumsatzraten in Flachwassermesokosmen.

A = Kontroll-Enclosure mit N-Limitation; C = (N + P)-angereicherter Enclosure.

NP = Nettoprimärproduktion; R = Respiration; Cy = Cyanobakterien; G = Grünalgen;

D = Diatomeen; B = Bakterien; Ci = Ciliaten; F = Flagellaten; MZP = Rotatorien;

ZP = Calaniden.

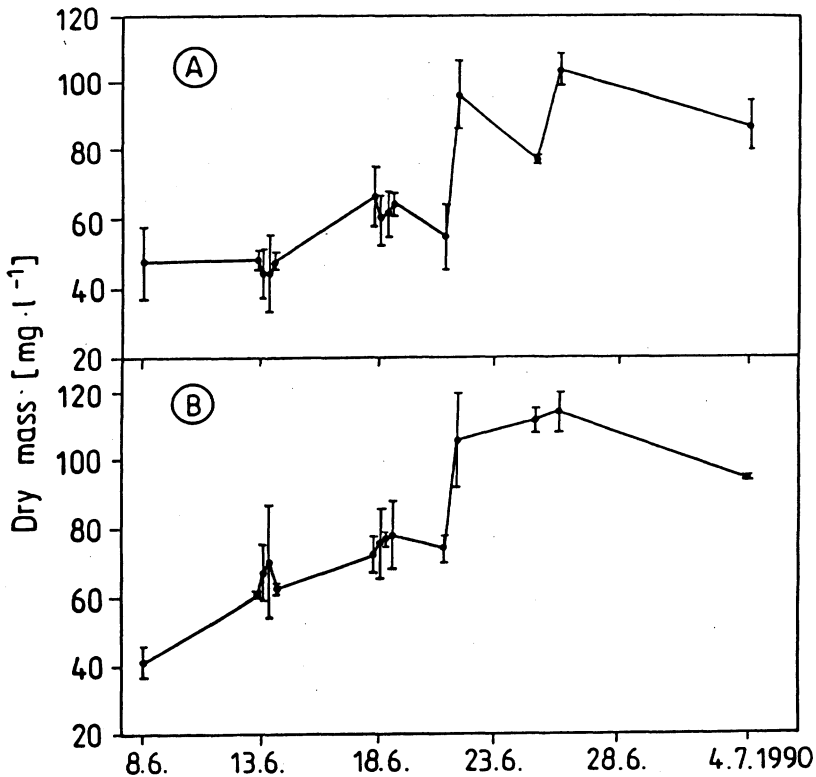


Abb. 6 Trockenmasseentwicklung in Mesokosmen; Sommersituation Zingster Strom.
 A = Kontroll-Enclosure; hocheutrophe Pelagialbiocenose unter fortschreitender N-Limitation. B = (N + P)-angereicherter Enclosure, bei dem das Phytoplankton lichtlimitiert ist.

Daraus läßt sich eine hohe Stabilität des Pelagial-Präsediment-Komplexes ableiten. Durch den überwiegenden Aufbau dieses Ökosystemkomplexes aus mikrobiellen Organismen vermag es schnell auf Belastungen zu reagieren und gleichzeitig über die Erhöhung der Reaktionsgeschwindigkeiten diese Belastungen abzuf puffern. Enge interne Verkopplungen innerhalb der Heterotrophen sichern die Stabilität ihrer Biomassen. Eine wichtige Schaltstelle in diesem Steuerungsmechanismus sind offenbar die Ciliaten und in den Sommermonaten der Ciliaten-Rotatorien-Komplex. Die sich daraus ergebenden praktischen Konsequenzen sind widersprüchlich:

- Zum einen sichert der Pelagial-Präsediment-Komplex bei zunehmender anorganischer und organischer Belastung die Stabilität des Gesamtsystems.
- Zum anderen stabilisiert er aber auch den bestehenden Ökosystemzustand gegen jede Art von Sanierungsmaßnahmen.

Eine wichtige systemstabilisierende Komponente ist der Detritus. Er kann in unterschiedlicher Weise von den Heterotrophen genutzt werden. Für das Phytoplankton begrenzt er über Lichtabsorption und -streuung das verfügbare Licht. Bei Sedimentation des Detritus während windstiller und sonniger Perioden besteht in zunehmenden Maße die Gefahr des Auftretens massiver Pico- und Nanophytoplanktonblüten (Grünalgen, Cyanobakterien). Da es sich beim Picophytoplankton unter mehr brackigen Bedingungen vorwiegend um Cyanobakterien handelt, ist das Auftreten toxischer Formen nicht auszuschließen. Das gilt auch für toxische Flagellaten.

Um die Frage zu klären, wie effektiv Eingriffe in das bestehende Ökosysteme überhaupt sein können, eignet sich ein Blick auf die bisherige Systementwicklung. Sie ist geprägt durch eine nichtlineare Zunahme des Trophiegrades in den letzten 30 Jahren (Abb. 7).

Unsere 20-jährigen Untersuchungen haben gezeigt, daß die Veränderungen um 1969 eine Folge des erhöhten Eintrags anorganischer Nährstoffe waren. Offen ist, wie stark sich der Zusammenbruch der Makrophytenvegetation in den westlichen Boddenteilen darauf ausgewirkt hat. Die dramatischen Trophie-

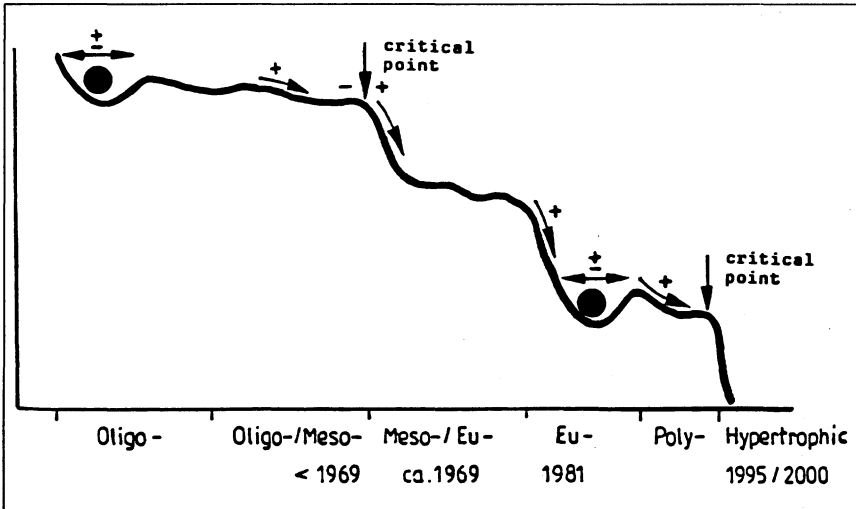


Abb. 7 Hypothesisches Modell zum Eutrophierungsverlauf im Barther Bodden (nach SCHIEWER 1985).

veränderungen um 1981 waren mit dem Zusammenbruch der bis dahin in den Flachwasserbereichen der östlichen Bodden dominierenden submersen Makrophyten verbunden. Dieser Zusammenbruch wurde offenbar durch niedrige Salzgehalte und höhere Süßwassereinträge beschleunigt. Gegenwärtig vollzieht sich wahrscheinlich eine Umstrukturierung des Planktons, wobei das Nano- und Pico plankton begünstigt zu sein scheinen.

Aus den beschriebenen Abläufen läßt sich folgern, daß Sanierungsmaßnahmen in 3 Richtungen zu gehen haben:

- ♦ Reduktion des externen punktuellen und diffusen (N + P)-Eintrages
- ♦ Förderung des Netzplanktons
- ♦ Massive Förderung der submersen Makrophyten.

Der durch die Entwicklung zur Pico- und Nanoplanktondominanz im Pelagial erreichte Eutrophierungszustand bedingt allerdings, daß selbst umfangreiche Sanierungsmaßnahmen über Jahre hinaus vor allem in den westlichen Bodden kaum sichtbare Erfolge zeitigen werden. Es ist vielmehr damit zu rechnen, daß im Zuge der Sanierung zeitweise massive Phytoplanktonblüten auftreten können.

Literatur

- FENCHEL, T. M. and R. J. RIEDL: The sulfid system: a new biotic community underneath the oxidized layer of marine sand bottoms. - *Marine Biology* 7, 1970, - S. 255 - 268
- GEORGI, F.: Untersuchungen zur Variabilität von Quantität und Qualität des Sestons in den Darß-Zingster Boddengewässern. - Diss. A, Univ. Rostock, 1983
- MARTENS, C. S.: Some of the chemical consequences of microbially mediated degradation of organic materials in estuarine sediments. - *Biogeochem. of estuarine sediments*. UNESCO, Paris, pp., 1978, - S. 266 - 278
- SCHIEWER, U.: Analyse und Bewertung des im 5-Jahreszeitraum 1981/85 erreichten Kenntnisstandes und seine volkswirtschaftliche Verwertbarkeit auf der Grundlage der erbrachten Teilleistungen. - Forschungsbericht A4, Univ. Rostock, 1985
- WASMUND, N.: Die Größe der Primärproduktion im Barther Bodden (südliche Ostsee) unter besonderer Berücksichtigung des Mikrophytobenthos. - *Wiss. Z. Univ. Rostock* 35, 1986, S. 22 - 27

Verfasser

Prof.Dr. habil. Ulrich Schiewer
Universität Rostock
FB Biologie
18051 Rostock